

# 高松港における被害地震の 震度再現に関する研究

STUDY ON THE EVALUATION OF THE SEISMIC INTENSITY AT  
TAKAMATSU PORT BY THE PAST DESTRUCTIVE EARTHQUAKE

長尾 毅<sup>1</sup>・平松和也<sup>2</sup>・平井俊之<sup>3</sup>・野津 厚<sup>4</sup>

Takashi NAGAO, Kazuya HIRAMATSU, Toshiyuki HIRAI and Atsushi NOZU

<sup>1</sup>正会員 工博 国土技術政策総合研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>2</sup>正会員 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所(〒760-0017 高松市番町1-6-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 ㈱ニュージェック(〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

<sup>4</sup>正会員 工博 港湾空港技術研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

It is necessary to evaluate the forthcoming earthquake ground motion precisely from the viewpoint of coastal earthquake disaster prevention. In this study, we focus on the reproduction of the seismic intensity at Takamatsu port by the past destructive earthquake. Site amplification plays the key role in the reproduction of the seismic intensity at coastal areas because of the basin effects. In this study, we modified the site amplification factor based on the horizontal over vertical spectral ratio of the microtremor record and succeeded in reproducing the seismic intensity.

**Key Words:** *Microtremor, earthquake, site amplification factor*

## 1. はじめに

臨海部の防災工学の観点から、海溝型の巨大地震の発生に対する対応の検討が急務である。このためにはまず、想定される地震動を精度よく評価することが重要である。地震動の評価の方法としては様々なグレードが考えられる。最も簡易な方法としては、加速度や速度最大値などの特定の指標によることも考えられるが、加速度や速度最大値のみでは、想定される地震動に対する構造物などの被害を精度よく推定することは困難である。

近年の地震工学の発展により、近い将来に発生が予想される巨大地震を時刻歴波形として評価し、震度などを評価する試みが中央防災会議の場を始めとして行われつつある。地震動の時刻歴波形が評価できれば、震度のみならず、構造物の被害予測を精度よく行うことも可能になる。このため、臨海部の防災工学においてもこのような検討が有用であると考えられる。ただし、臨海部特有の問題として、盆地構造に伴うサイト特性の影響の考慮が重要であると考えられる。ここで、盆地構造とは、工学的基盤ではなく、地震基盤(せん断波速度=3000m/s相当の岩盤)に至る深層部の地盤構造によるもので、内陸部と比較して臨海部では一般的に、構造物の被害に影響の大きい長周期側の地震動の増幅が大きい傾向を示す。サイト特性はボーリングデータなどから評価することは困難であるため、強震記録のスペクトル

インバージョンなどにより求められることとなる<sup>1)</sup>。最終的に時刻歴波形として求められた地震動の精度の確認方法として、過去の被害地震における震度の再現性の評価をすることが考えられる。このような観点から本研究では、高松港における過去の被害地震の震度再現を試みる。

高松は1707年宝永地震、1854年安政南海地震等の歴史地震において被害を受けており、宝永地震では震度6と推定されているほか<sup>2)</sup>、安政南海地震においては、臨海部に位置する高松城天守櫓の瓦・壁が落下したと報告されている<sup>2)</sup>。これより、これら過去の南海トラフで発生した巨大地震による高松港の震度は6程度と考えられる。

本研究では、統計的グリーン関数法<sup>3)</sup>を用いて東南海・南海地震の再現評価を行う。高松港付近では海岸線からおおよそ1kmの位置にあるK-NET高松(強震ネットワーク, 防災科学技術研究所)による強震記録が得られているため、サイト特性はK-NET高松のものを用いることが考えられる。ただし、上述した臨海部盆地構造に起因する問題を確認するため、常時微動観測を実施し、その妥当性を確認する。

## 2. 高松港における常時微動観測

図-1に高松港周辺の常時微動観測地点を示す。観測は水平2成分と鉛直1成分を同時に観測する3成分

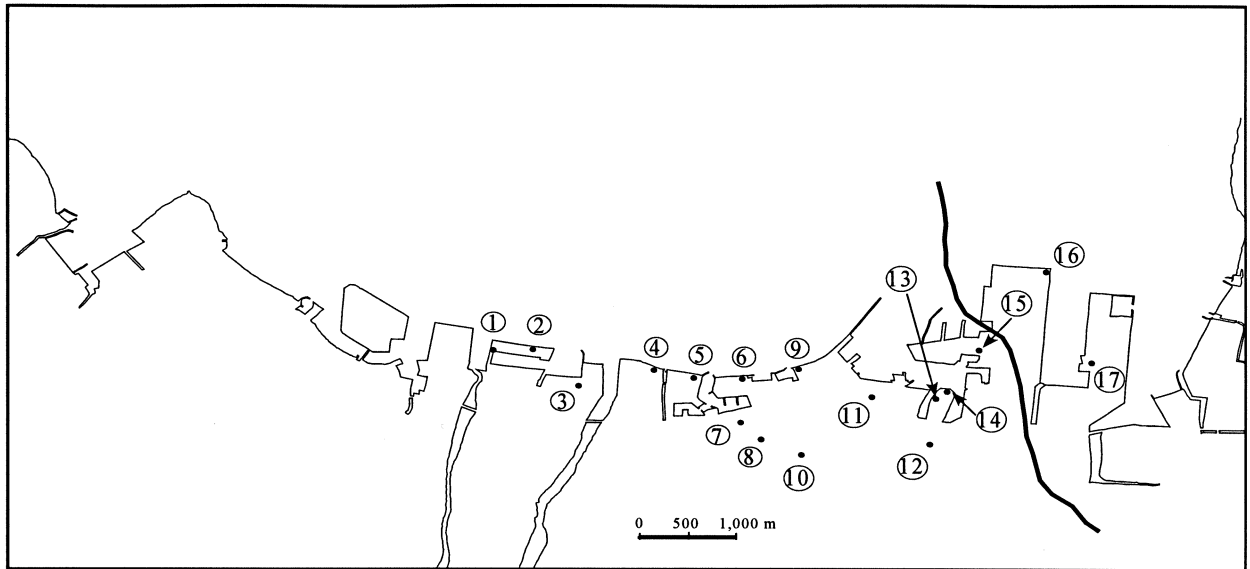


図-1 高松港観測地点

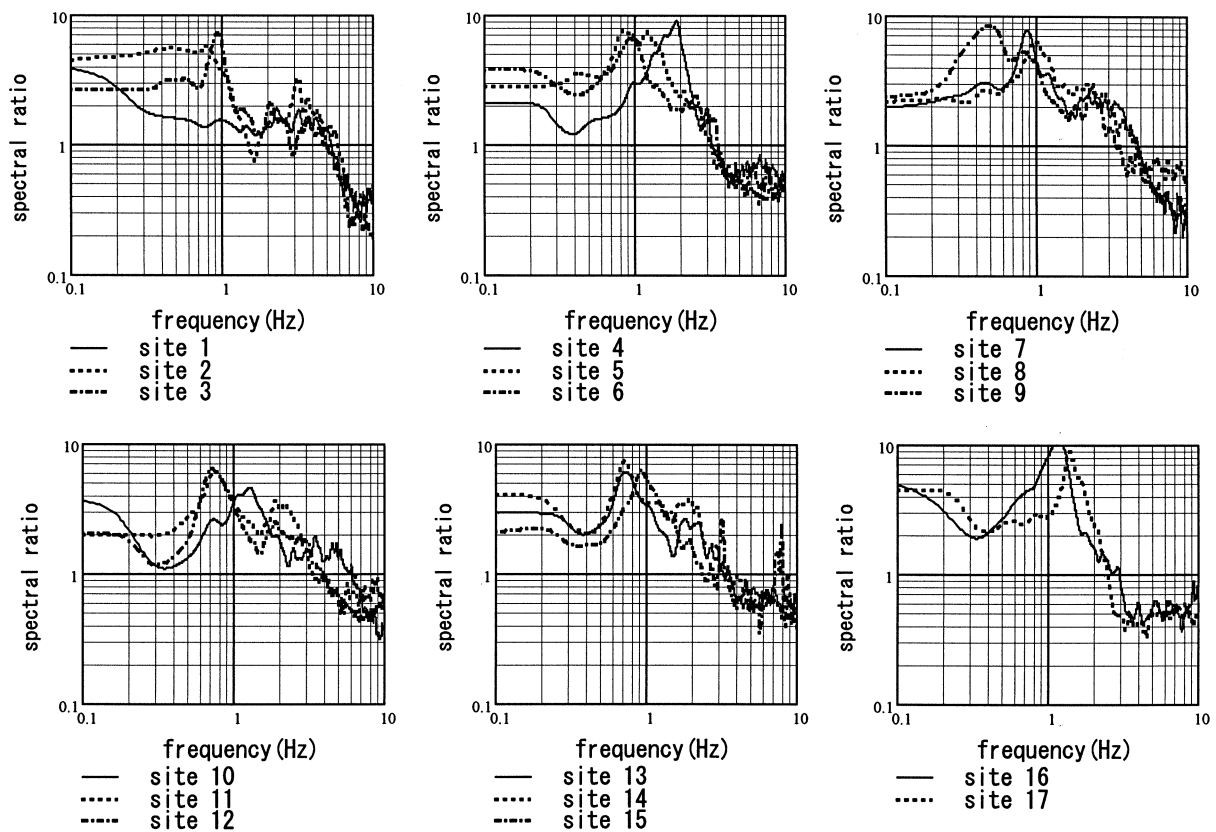


図-2 常時微動H/Vスペクトル

観測と、鉛直成分を離れた4点で同時に観測するアレー観測の2種類を行っている。観測時間は基本的に11分間、サンプリング周波数100Hzである。アレー観測実施地点は②木材工業団地、④新北町北公園、⑥健康体育センター、⑪玉藻公園、⑬城東町、⑯朝日地区である。⑪の玉藻公園が高松城の所在場所である。アレー観測は朝日地区以外については工学的基盤から上の表層の確認を目的としているため、

アレー半径は最大50mとしている。K-NET高松は⑩であり、⑬城東町については速度検層データがある。

3成分観測結果より得られる常時微動H/Vスペクトル（水平成分と鉛直成分の比）を図-2に示す。サイト増幅特性のリファレンスサイトであるK-NET高松⑩のピーク周波数は1.26Hzであるが、朝日地区⑯、⑰を除いては基本的に1.0Hz以下のピークとなっている。①および④については2Hz程度にピークがあ

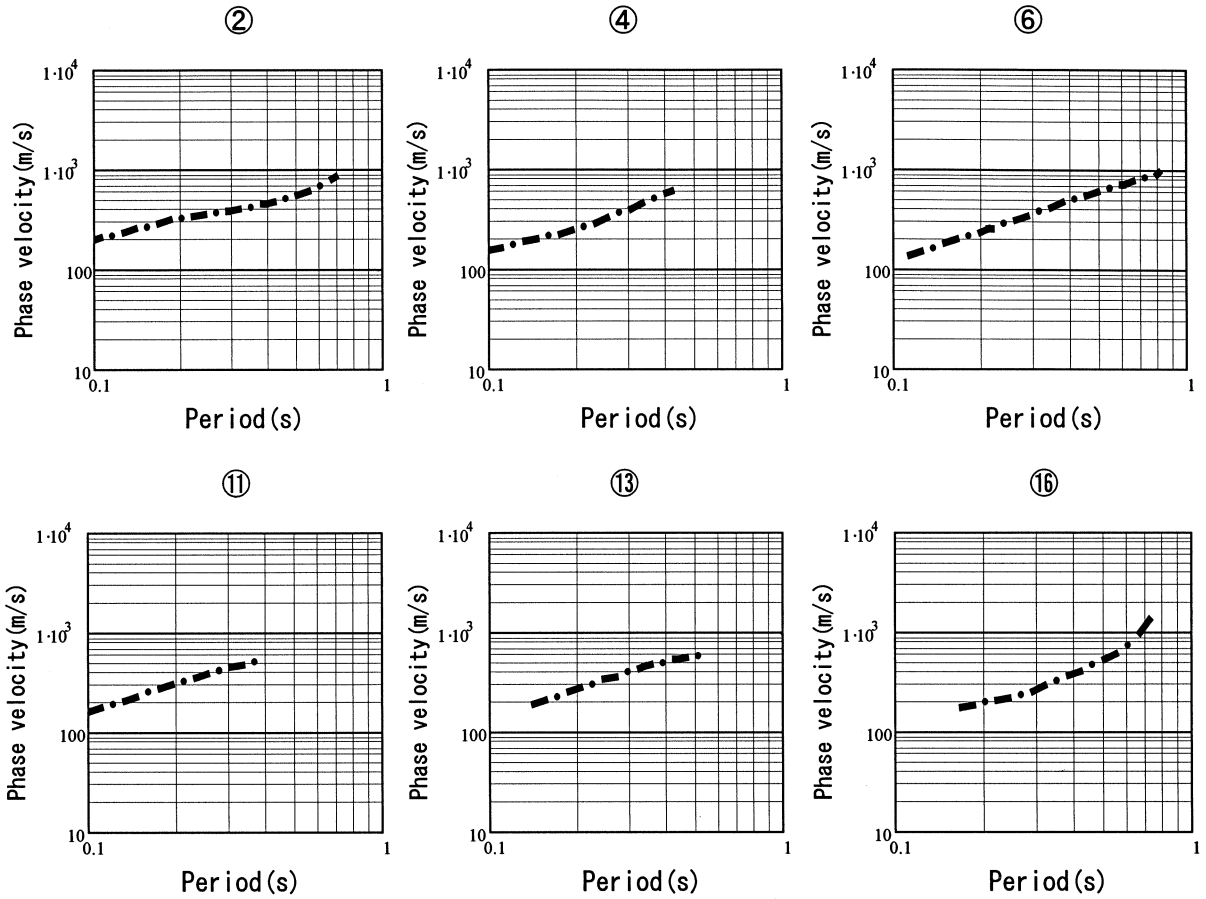


図-3 観測位相速度

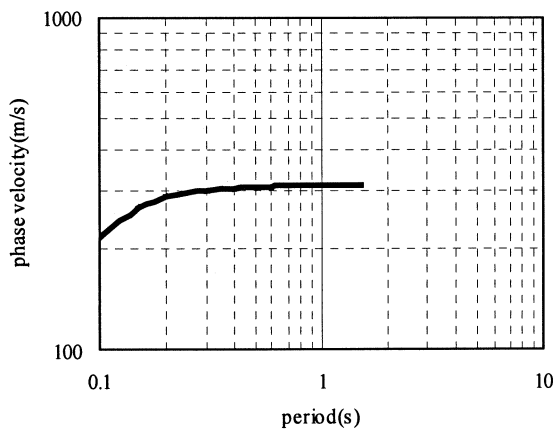


図-4 城東町理論位相速度

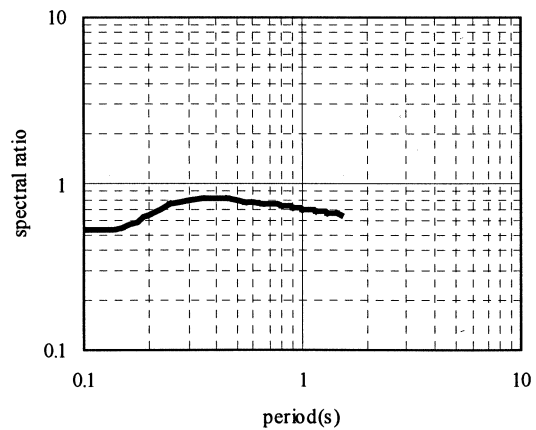


図-5 城東町理論H/Vスペクトル

り、1Hz程度に明瞭なピークが認められないが、これは表層部分のインピーダンスコントラストの影響によるものと考えられる。なお、周辺の②および③では1Hz程度のピークが見られる。常時微動H/Vスペクトルはレイリー波H/V振幅スペクトルで近似でき<sup>4)</sup>、各種の地盤構造に対するレイリー波H/V振幅スペクトルと周波数伝達関数のピーク周期の比較から、両者がほぼ一致するといわれている<sup>5)</sup>。従って、

常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数の大小は基盤深さに対応していると考えることができ、高松港周辺では図-1に実線で示したように朝日地区以外は基盤が深く、K-NET高松のサイト特性をそのまま適用することは適切でない可能性がある。

ここで、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数が工学的基盤より浅い表層地盤のみの影響によるものではないことを確認する必要がある。このために、

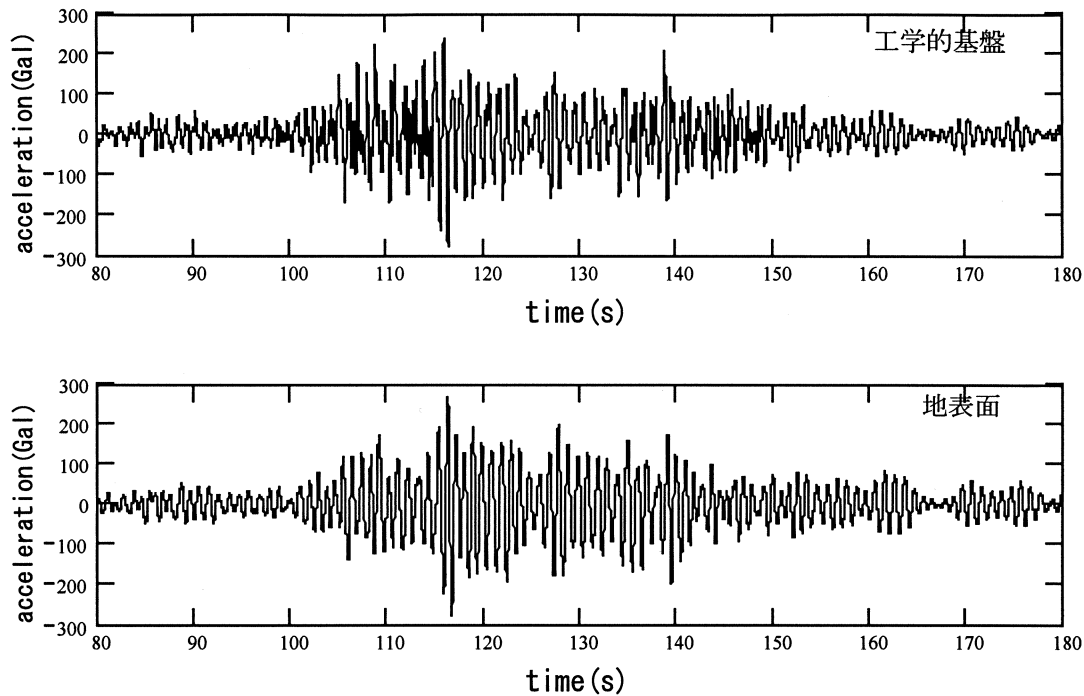


図-6 高松城付近の時刻歴波形(東南海・南海地震の強震動評価)

アレー観測結果をもとに空間自己相関法<sup>6)</sup>を適用して得られる位相速度を図-3に示す。図-4には、③城東町における速度検層の結果得られている工学的基盤までのS波速度構造をもとに算出した理論位相速度を示す。ここで、位相速度とは常時微動において卓越していると考えられる表面波の一種であるレイリー波の伝わる速度をいい、地盤のS波速度構造に依存する。地盤のS波速度は通常、表層で小さく、深部ほど大きい構造であるため、位相速度は周期の短い領域では小さく、長周期側では大きな値を取る。このため、位相速度を検討することにより地盤のS波速度構造を推定することが可能である。

観測位相速度は短周期側では各地点ともほぼ同じ値を示している。これは、工学的基盤よりも上部の表層の地盤のS波速度構造は、各地点とも大きな違いがないことを示している。観測位相速度と理論位相速度は短周期側で調和的な結果を示している。0.2秒以上の領域では観測された位相速度の方が理論位相速度よりも高い速度を示しているが、これは観測値には工学的基盤よりも深いS波速度構造の影響が含まれているためである。

図-5には城東町速度検層結果による基本モードレイリー波のH/Vスペクトルを示す。明瞭なピークは認められない。従って、城東町の常時微動H/Vスペクトルで見られる1秒のピークは工学的基盤より下層の堆積層の影響を含んだピークであるといえる。このことから、高松港においては地震基盤に至る地盤構造が盆地構造を示しており、内陸部と臨海部でサイト特性が異なるといえる。

次に、高松港における震度再現のため、高松城玉

藻公園における常時微動アレー観測結果をもとにした逆解析により、高松城周辺の表層地盤のS波速度構造の推定を行った。推定にあたり、四国地盤情報データベースをもとに、地表面から11.5mを砂地盤、次いで10.5mを粘性土地盤とし、工学的基盤の深さを22mとして逆解析を行った。得られた地盤構造を表-1に示す。

表-1 高松城地盤モデル

S波速度(m/s)	P波速度(m/s)	層厚(m)	土質
110	410	3.0	砂
210	1620	6.0	砂
170	1620	2.5	砂
195	1620	3.5	粘土
280	2080	7.0	粘土
340	2080	-	工学的基盤

### 3. 高松港における震度再現

図-6に統計的グリーン関数法により得られた東南海・南海地震波を示す。統計的グリーン関数法<sup>3)</sup>は、グリーン関数を過去の地震記録の統計解析結果に基づいて設定し、これを重ね合わせることでより大地震の地震動を予測するものである。ここではまず、サイト特性をK-NET高松のものとした結果を示している。3成分について波形を求めており、図示したのは水平NS成分である。工学的基盤の波形をもとにして等価線形地震応答解析コードSHAKEを用い

表-2 モデル地盤構造

	S波速度 (m/s)	層厚(m)	
		case1	case2
層1	800	160	270
層2	3000	—	—

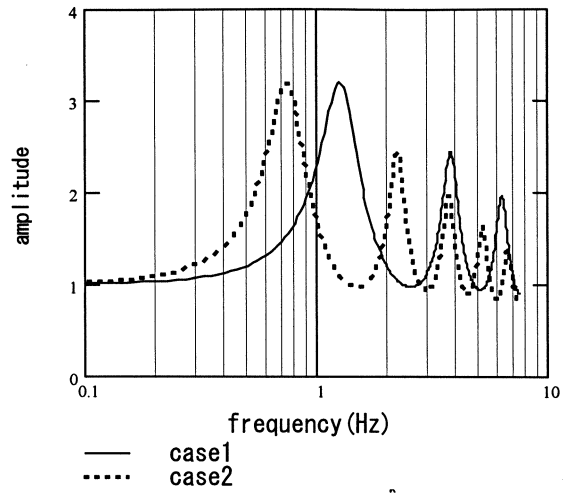


図-7 周波数伝達関数

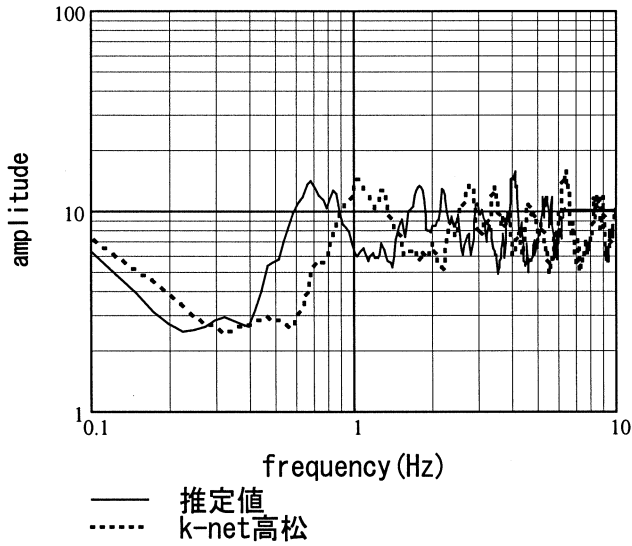


図-8 サイト特性比較

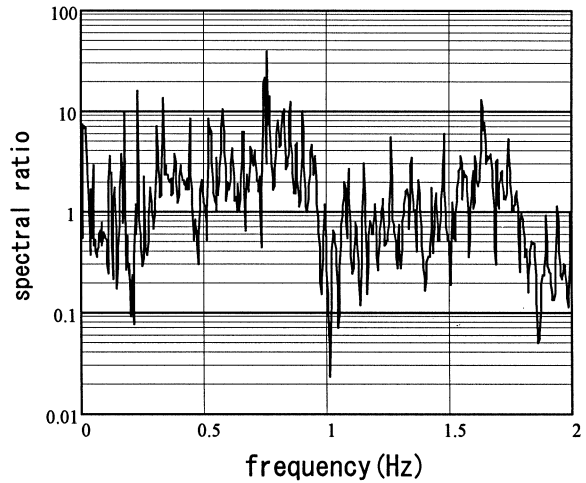


図-9 フーリエスペクトル比 (補正後/補正前)

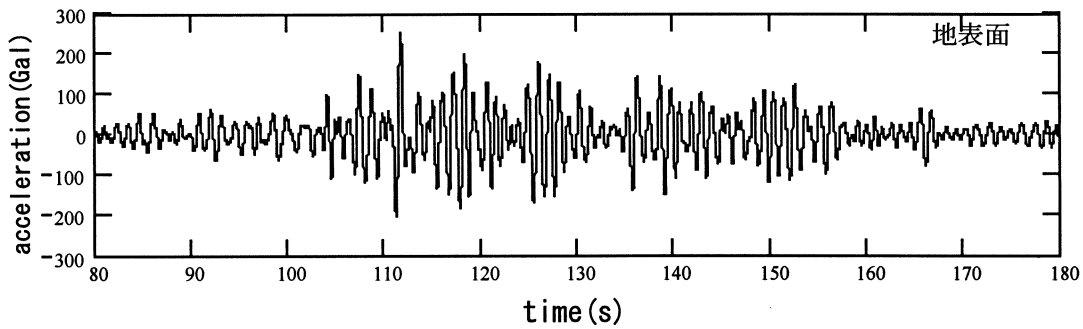
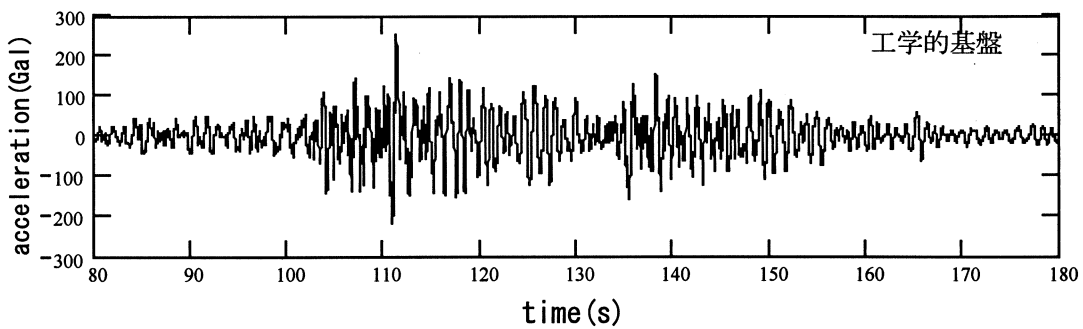


図-10 補正されたサイト増幅特性を用いた高松城付近の地震波形

て表-1の地盤構造をもとに地表面の波形を求め、これより震度を算出したところ、震度は5強となり、やや低い震度が算出された。

震度が低く算定された理由として、これまで述べてきたようにサイト特性の影響が考えられる。このため、常時微動H/Vスペクトルをもとにサイト特性の補正を検討した。K-NET高松地点の常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数は1.26Hz、玉藻公園では0.74Hzである。

いま簡単のために表-2に示すように表層がS波速度=800m/s、基盤がS波速度=3000m/sの2層構造を考える。表層の層厚として160m (case1)、270m (case2)の2つのケースを考えると、case1、case2の固有周波数はそれぞれ1.26Hz、0.74Hzとなる。減衰定数を3%とすると両者の周波数伝達関数は、図-7に示すようになる。固有周波数の大きいcase1の周波数伝達関数を、水平軸に関して固有周波数の比(=0.74/1.26)で比例配分するとcase2のものに一致する。いまサイト特性を周波数伝達関数と等価なものと考え、K-NET高松の地表面に関するサイト特性を、ピーク周波数が0.74Hzとなるように水平軸に関して比例配分することにより、図-8に示すように、玉藻公園のサイト特性を推定できると考えられる。

このように補正したサイト特性を表-1の地盤構造をもとに工学的基盤に引き戻し、再度、工学的基盤における東南海・南海地震波を推定した。図-9に示すように補正された地震波形のフーリエスペクトルはK-NET地点の特性を用いた波形のものよりも長周期側で振幅が大きいもので、これをもとに再度一次元の地震応答計算により震度検討を行ったところ震度は6弱となり、概ね過去の被害地震の震度を再現することができた。水平NS成分の時刻歴波形は図-10に示すとおりである。

なお、実際の地盤構造は2層ではないため、卓越周波数が変化すると、最大振幅が変化する可能性がある。また、サイト特性は、成層状態の地盤構造に鉛直1次元入射する増幅のみならず、2次元・3次元の増幅の影響などの他の要因を含んだものである。

このため、今回の方法の適用性については、今後更に検討を行う必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、統計的グリーン関数法を用いて東南海・南海地震の再現評価を行った。地震動の評価を行う際に、サイト特性の評価は非常に重要である。サイト特性は強震記録のスペクトルインバージョンなどにより求められるが、強震計は内陸部に設置されていることが多く、その特性を臨海部にそのまま適用してよいかどうかは慎重に検討を行うことが必要である。臨海部においては盆地構造のためにサイト特性の空間的変化が大きい場合があるため、各種の観測を用いて正確な評価を行うことが重要である。本研究では常時微動観測結果を用いて補正を行うことにより精度の高い評価が可能となった。

#### 参考文献

- 1) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析, 土木学会論文集, No.801, I-73, pp.141-158, 2005
- 2) 宇佐美龍夫: 最新版日本被害地震総覧[416]-2001, 東京大学出版会, 2003
- 3) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第430号, 1-9, 1991
- 4) 時松孝次, 宮寺泰生: 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集No.439, pp.81-87, 1992
- 5) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄 巧: 常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集No.489, I-27, pp.251-260, 1994
- 6) Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic wave, with special reference to microtremors, *Bulletin, Earthquake Research Institute*, Vol.35, pp.415-456, 1957